

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-40495

(P2002-40495A)

(43) 公開日 平成14年2月6日 (2002.2.6)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームト* (参考)
G 0 2 F 1/35	5 0 1	G 0 2 F 1/35	2 K 0 0 2
		1/365	5 F 0 7 2
H 0 1 S 3/06		H 0 1 S 3/06	B
3/094		3/30	Z
3/30		3/094	S
審査請求 未請求 請求項の数17 O L (全 16 頁)			

(21) 出願番号 特願2000-220967 (P2000-220967)

(22) 出願日 平成12年7月21日 (2000.7.21)

(71) 出願人 000002130

住友電気工業株式会社

大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号

(72) 発明者 津▲崎▼ 哲文

神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

(72) 発明者 村嶋 清孝

神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

Fターム(参考) 2K002 AB30 BA01 DA10 HA23

5F072 AB07 AK06 JJ05 JJ20 KK30

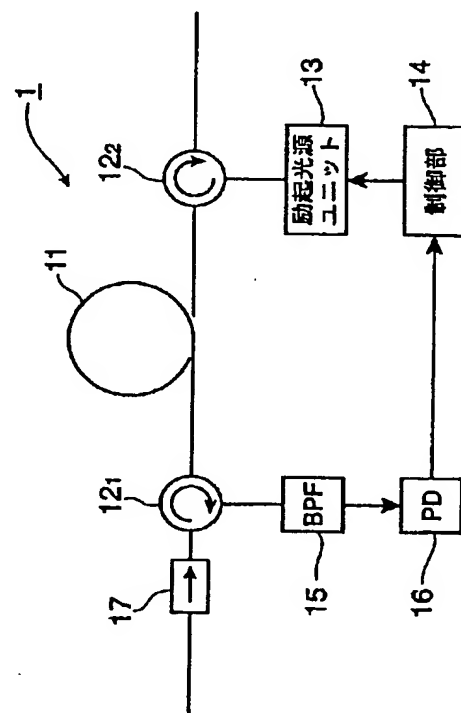
PP07 QQ07 YY17

(54) 【発明の名称】 ラマン増幅器

(57) 【要約】

【課題】 信号光波長帯域において利得スペクトル平坦化の制御が容易であるラマン増幅器を提供する。

【解決手段】 励起光源ユニット13から出力されたラマン増幅用励起光は光サーキュレータ122を経てラマン増幅用光ファイバ11に供給される。残留したラマン増幅用励起光は光サーキュレータ121およびバンドパスフィルタ15を経て受光素子16により検出される。ラマン増幅器1に到達した信号光は、ラマン増幅用光ファイバ11を伝搬するとともにラマン増幅される。制御部14により、受光素子16により検出された残留ラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、励起光源ユニット13に含まれるN個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルの形状が制御される。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 信号光を伝送するとともに、ラマン増幅用励起光が供給されることにより前記信号光をラマン増幅するラマン増幅用光ファイバと、

出力する光のスペクトルが単峰型でない励起光源を N 個 ($N \geq 1$) 有し、これら N 個の励起光源から出力される光を前記ラマン増幅用励起光として前記ラマン増幅用光ファイバに供給するラマン増幅用励起光供給手段とを備えることを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 2】 前記ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後の残留した前記ラマン増幅用励起光のパワーを検出する残留励起光パワー検出手段と、

前記残留励起光パワー検出手段により検出された前記ラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 3】 前記ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後の各波長の信号光のレベルを検出する信号光レベル検出手段と、

前記信号光レベル検出手段により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 4】 前記ラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布を検出する光ファイバ損失分布検出手段と、前記光ファイバ損失分布検出手段により検出された前記ラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布に基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 5】 前記信号光とともに伝送されるパイロット光が前記ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後のレベルを検出するパイロット光レベル検出手段と、前記パイロット光レベル検出手段により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 6】 前記ラマン増幅用光ファイバに入力する信号光のパワーを検出する入力信号光パワー検出手段と、

前記ラマン増幅用光ファイバから出力される信号光のパワーを検出する出力信号光パワー検出手段と、

前記入力信号光パワー検出手段により検出された入力信号光パワーおよび前記出力信号光パワー検出手段により検出された出力信号光パワーに基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴と

る請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 7】 前記ラマン増幅用光ファイバに入力する信号光の波長を検出する信号光波長検出手段と、

前記信号光波長検出手段により検出された信号光の波長に基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれがラマン増幅用励起光を出力するか否かを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 8】 信号光を伝送するとともに、ラマン増幅用励起光が供給されることにより前記信号光をラマン増幅するラマン増幅用光ファイバと、

出力する光のスペクトルが可変である励起光源を N 個 ($N \geq 1$) 有し、これら N 個の励起光源から出力される光を前記ラマン増幅用励起光として前記ラマン増幅用光ファイバに供給するラマン増幅用励起光供給手段と、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御する制御手段とを備えることを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 9】 前記ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後の残留した前記ラマン増幅用励起光のパワーを検出する残留励起光パワー検出手段を更に備え、

前記制御手段が、前記残留励起光パワー検出手段により検出された前記ラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする請求項 8 記載のラマン増幅器。

【請求項 10】 前記ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後の各波長の信号光のレベルを検出する信号光レベル検出手段を更に備え、

前記制御手段が、前記信号光レベル検出手段により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする請求項 8 記載のラマン増幅器。

【請求項 11】 前記ラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布を検出する光ファイバ損失分布検出手段を更に備え、

前記制御手段が、前記光ファイバ損失分布検出手段により検出された前記ラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布に基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする請求項 8 記載のラマン増幅器。

【請求項 12】 前記信号光とともに伝送されるパイロット光が前記ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後のレベルを検出するパイロット光レベル検出手段を更に備え、

前記制御手段が、前記パイロット光レベル検出手段により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、前記 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする請求項 8 記載のラマン増幅器。

【請求項 13】 前記ラマン増幅用光ファイバに入力する信号光のパワーを検出する入力信号光パワー検出手段と、

前記ラマン増幅用光ファイバから出力される信号光のパワーを検出する出力信号光パワー検出手段と、

を更に備え、

前記制御手段が、前記入力信号光パワー検出手段により検出された入力信号光パワーおよび前記出力信号光パワー検出手段により検出された出力信号光パワーに基づいて、前記N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする請求項8記載のラマン増幅器。

【請求項 14】 前記ラマン増幅用光ファイバに入力する信号光の波長を検出する信号光波長検出手段を更に備え、

前記制御手段が、前記信号光波長検出手段により検出された信号光の波長に基づいて、前記N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする請求項8記載のラマン増幅器。

【請求項 15】 前記N個の励起光源の何れかは、希土類元素が光導波領域に添加された希土類元素添加光ファイバと、この希土類元素を励起する希土類元素励起光を前記希土類元素添加光ファイバに供給する希土類元素励起光供給手段とを有し、

前記希土類元素励起光供給手段による希土類元素励起光の供給に伴い前記希土類元素添加光ファイバにおいて発生し増幅された自然放光を前記ラマン増幅用励起光とすることを特徴とする請求項1または8に記載のラマン増幅器。

【請求項 16】 前記希土類元素添加光ファイバが複数段接続されていることを特徴とする請求項15記載のラマン増幅器。

【請求項 17】 前記N個の励起光源の何れかは、前記ラマン増幅用光ファイバに前記ラマン増幅用励起光として供給する前記増幅された自然放光のスペクトルを調整する光フィルタを更に備えることを特徴とする請求項15記載のラマン増幅器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、信号光を用いて通信を行う光通信システムにおいて信号光が光伝送路を伝送される際に被る伝送損失をラマン増幅により補償するラマン増幅器に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 信号光を用いて通信を行う光通信システムにおいて、送信器から送出された信号光は、光伝送路を伝送される際に伝送損失を被り、受信器に到達するときにはパワーが小さくなる。受信器に到達した信号光のパワーが所定値以下であると、受信エラーに因り正常に

光通信を行えない場合が生じ得る。そこで、送信器と受信器との間に光増幅器を設けて、この光増幅器により信号光を増幅することで、信号光が光伝送路を伝送される際に被る伝送損失を補償することが行われている。

【0003】 このような光増幅器には、希土類元素が添加された増幅用光ファイバを用いた希土類元素添加光ファイバ増幅器（例えばEr元素添加光ファイバ増幅器）と、ラマン増幅用光ファイバにおけるラマン増幅現象を利用したラマン増幅器とがある。希土類元素添加光ファイバ増幅器と比べると、ラマン増幅器は、ラマン増幅用励起光の波長を適切に設定することで利得を有する波長帯域を所望のものにすることが可能である等の特徴を有している。

【0004】 また、所定の信号光波長帯域内の多波長の信号光を多重化して光通信を行う波長多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）光通信システムでは、この信号光波長帯域における光増幅器の利得スペクトルは平坦であることが重要である。さもないと、信号光波長帯域内の或る波長の信号光は受信器により正常に受信されたとしても、利得が小さい他の波長の信号光は受信エラーが生じる場合があるからである。そこで、ラマン増幅器の利得スペクトルを平坦化する技術について研究がなされている。

【0005】 例えば、文献1「Y. Emori, et al., "100 nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes", OFC'99, PD19 (1999)」に記載されたラマン増幅器の利得平坦化技術では、N個（ $N \geq 2$ ）の励起光源それぞれから出力された光を合波したものをラマン増幅用励起光としてラマン増幅用光ファイバに供給する。そして、N個の励起光源それぞれの出力中心波長および出力パワーを適切に設定することで、ラマン増幅器の利得スペクトルの平坦化を図っている。文献1では、励起光源の個数Nを12としている。

【0006】 また、文献2「F. Koch, et al., "Broadband gain flattened Raman Amplifier to extend operation in the third telecommunication window", OFC'2000, ThD, FF3 (2000)」に記載されたラマン増幅器の利得平坦化技術では、ラマン増幅用光ファイバにおける利得スペクトルと略同形状の損失スペクトルを有する利得等化器を設けることで、ラマン増幅器の利得スペクトルの平坦化を図っている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、上記の従来のラマン増幅器の利得平坦化技術は、以下のような問題点を有している。すなわち、長距離の光通信を行う光通信システムにおいては、送信器と受信器との間にM個（ $M \geq 2$ ）のラマン増幅器を備える必要がある場合がある。この場合に、文献1に記載された利得平坦化技術を採用するとすれば、光通信システムの全体で必要とな

る励起光源の総数は $M \times N$ となっており、これら多数の励起光源それぞれの出力パワーを制御しなければならず、ラマン増幅器の利得スペクトルの平坦化の制御は容易ではない。

【0008】また、文献2に記載された利得平坦化技術を採用したラマン増幅器では、ラマン増幅用光ファイバにおいて信号光を光増幅しておきながら、利得等化器において信号光を減衰させるものである。したがって、この利得等化器の損失スペクトルを制御しなければならず、やはり、ラマン増幅器の利得スペクトルの平坦化の制御は容易ではない。

【0009】本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、信号光波長帯域において利得スペクトル平坦化の制御が容易であるラマン増幅器を提供することを目的とする。

【0010】

【課題を解決するための手段】本発明に係るラマン増幅器は、(1) 信号光を伝送するとともに、ラマン増幅用励起光が供給されることにより信号光をラマン増幅するラマン増幅用光ファイバと、(2) 出力する光のスペクトルが単峰型でない励起光源を N 個($N \geq 1$)有し、これら N 個の励起光源から出力される光をラマン増幅用励起光としてラマン増幅用光ファイバに供給するラマン増幅用励起光供給手段とを備えることを特徴とする。

【0011】このラマン増幅器によれば、 N 個の励起光源を有するラマン増幅用励起光供給手段よりラマン増幅用励起光がラマン増幅用光ファイバに供給される。そして、このラマン増幅用光ファイバにより信号光が伝送されるとともにラマン増幅される。すなわち、信号光がラマン増幅用光ファイバを伝送する際に被る伝送損失がラマン増幅により補償される。特に、このラマン増幅器は、ラマン増幅用励起光供給手段に含まれる N 個の励起光源が出力する光のスペクトルが単峰型ではないので、従来の技術の欄に挙げた文献1のものと比較して、励起光源の個数を少なくすることができるので、利得スペクトルの平坦化の制御が容易である。また、このラマン増幅器は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、従来の技術の欄に挙げた文献2のものと比較して、やはり、利得スペクトルの平坦化の制御が容易である。なお、「スペクトルが単峰型でない」とは、出力パワーが最大となる波長とは別に極大となる波長が存在することだけでなく、最大または極大となる波長が互いに5nm以上離れていることを意味する。

【0012】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後の残留したラマン増幅用励起光のパワーを検出する残留励起光パワー検出手段と、(2) 残留励起光パワー検出手段により検出されたラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワ

ーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする。この場合には、残留励起光パワー検出手段により検出されたラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0013】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後の各波長の信号光のレベルを検出する信号光レベル検出手段と、(2) 信号光レベル検出手段により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする。この場合には、信号光レベル検出手段により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0014】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布を検出する光ファイバ損失分布検出手段と、(2) 光ファイバ損失分布検出手段により検出されたラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布に基づいて、 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする。この場合には、光ファイバ損失分布検出手段により検出されたラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布に基づいて、 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0015】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) 信号光とともに伝送されるパイロット光がラマン増幅用光ファイバを伝搬した後のレベルを検出するパイロット光レベル検出手段と、(2) パイロット光レベル検出手段により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする。この場合には、パイロット光レベル検出手段により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、 N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0016】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1)

ラマン増幅用光ファイバに入力する信号光のパワーを検出する入力信号光パワー検出手段と、(2) ラマン増幅用光ファイバから出力される信号光のパワーを検出する出力信号光パワー検出手段と、(3) 入力信号光パワー検出手段により検出された入力信号光パワーおよび出力信号光パワー検出手段により検出された出力信号光パワーに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする。この場合には、入力信号光パワーおよび出力信号光パワーに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0017】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバに入力する信号光の波長を検出する信号光波長検出手段と、(2) 信号光波長検出手段により検出された信号光の波長に基づいて、N個の励起光源それぞれがラマン増幅用励起光を出力するか否かを制御する制御手段とを更に備えることを特徴とする。この場合には、信号光波長検出手段により検出された信号光の波長に基づいて、N個の励起光源それぞれがラマン増幅用励起光を出力するか否かが制御手段により制御されるので、信号光の波長によっては、使用する励起光源の個数を減らすことができる。

【0018】他の本発明に係るラマン増幅器は、(1) 信号光を伝送するとともに、ラマン増幅用励起光が供給されることにより信号光をラマン増幅するラマン増幅用光ファイバと、(2) 出力する光のスペクトルが可変である励起光源をN個 ($N \geq 1$) 有し、これらN個の励起光源から出力される光をラマン増幅用励起光としてラマン増幅用光ファイバに供給するラマン増幅用励起光供給手段と、(3) N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御する制御手段とを備えることを特徴とする。

【0019】このラマン増幅器によれば、N個の励起光源を有するラマン増幅用励起光供給手段よりラマン増幅用励起光がラマン増幅用光ファイバに供給される。そして、このラマン増幅用光ファイバにより信号光が伝送されるとともにラマン増幅される。すなわち、信号光がラマン増幅用光ファイバを伝送する際に被る伝送損失がラマン増幅により補償される。特に、このラマン増幅器は、ラマン増幅用励起光供給手段に含まれるN個の励起光源が出力する光のスペクトルが可変であり制御手段により制御されるので、従来の技術の欄に挙げた文献1のものと比較して、励起光源の個数を少なくすることができるので、利得スペクトルの平坦化の制御が容易である。また、このラマン増幅器は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、

従来の技術の欄に挙げた文献2のものと比較して、やはり、利得スペクトルの平坦化の制御が容易である。

【0020】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後の残留したラマン増幅用励起光のパワーを検出する残留励起光パワー検出手段を更に備え、(2) 制御手段が、残留励起光パワー検出手段により検出されたラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする。この場合には、残留励起光パワー検出手段により検出されたラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0021】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバを伝搬した後の各波長の信号光のレベルを検出する信号光レベル検出手段を更に備え、(2) 制御手段が、信号光レベル検出手段により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする。この場合には、信号光レベル検出手段により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0022】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布を検出する光ファイバ損失分布検出手段を更に備え、(2) 制御手段が、光ファイバ損失分布検出手段により検出されたラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布に基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする。この場合には、光ファイバ損失分布検出手段により検出されたラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布に基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0023】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) 信号光とともに伝送されるパイロット光がラマン増幅用光ファイバを伝搬した後のレベルを検出するパイロット光レベル検出手段を更に備え、(2) 制御手段が、パイロット光レベル検出手段により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを

特徴とする。この場合には、パイロット光レベル検出手段により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0024】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバに入力する信号光のパワーを検出する入力信号光パワー検出手段と、(2) ラマン増幅用光ファイバから出力される信号光のパワーを検出する出力信号光パワー検出手段と、を更に備え、(3) 制御手段が、入力信号光パワー検出手段により検出された入力信号光パワーおよび出力信号光パワー検出手段により検出された出力信号光パワーに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする。この場合には、入力信号光パワーおよび出力信号光パワーに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御手段により制御されるので、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0025】また、本発明に係るラマン増幅器は、(1) ラマン増幅用光ファイバに入力する信号光の波長を検出する信号光波長検出手段を更に備え、(2) 制御手段が、信号光波長検出手段により検出された信号光の波長に基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のスペクトルを制御することを特徴とする。この場合には、信号光波長検出手段により検出された信号光の波長に基づいて、N個の励起光源それぞれがラマン増幅用励起光を出力するか否かが制御手段により制御されるので、信号光の波長によっては、使用する励起光源の個数を減らすことができる。

【0026】また、N個の励起光源の何れかは、希土類元素が光導波領域に添加された希土類元素添加光ファイバと、この希土類元素を励起する希土類元素励起光を希土類元素添加光ファイバに供給する希土類元素励起光供給手段とを有し、希土類元素励起光供給手段による希土類元素励起光の供給に伴い希土類元素添加光ファイバにおいて発生し増幅された自然放出光をラマン増幅用励起光とすることを特徴とする。この場合には、希土類元素励起光供給手段により希土類元素励起光が希土類元素添加光ファイバに供給されると、希土類元素添加光ファイバに添加された希土類元素が励起されて、希土類元素添加光ファイバから自然放出光が発生する。そして、この自然放出光は、ラマン増幅用励起光としてラマン増幅用光ファイバに供給される。

【0027】また、組成が互いに異なる希土類元素添加光ファイバが複数段接続されていることを特徴とする。

また、N個の励起光源の何れかは、ラマン増幅用光ファイバにラマン増幅用励起光として供給する自然放出光のスペクトルを調整する光フィルタを更に備えることを特徴とする。これら何れの場合にも、ラマン増幅用光ファイバにおけるラマン増幅の利得スペクトルを平坦化の上で好適である。

【0028】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0029】(第1の実施形態) 先ず、本発明に係るラマン増幅器の第1の実施形態について説明する。図1は、第1の実施形態に係るラマン増幅器1の構成図である。このラマン増幅器1は、ラマン増幅用光ファイバ11、光サーキュレータ121、122、励起光源ユニット13、制御部14、バンドパスフィルタ15、受光素子16および光アイソレータ17を備えている。

【0030】ラマン増幅用光ファイバ11は、光サーキュレータ122よりラマン増幅用励起光が供給され、光サーキュレータ121から光サーキュレータ122へ信号光を伝送するとともに、この信号光をラマン増幅する。光アイソレータ17は、順方向にのみ光を通過させ、逆方向には光を通過させない。光サーキュレータ121は、光アイソレータ17から到達した信号光をラマン増幅用光ファイバ11へ出力するとともに、ラマン増幅用光ファイバ11から到達した光をバンドパスフィルタ15へ出力する。光サーキュレータ122は、ラマン増幅用光ファイバ11から到達した信号光を後段へ出力するとともに、励起光源ユニット13から到達したラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ11へ出力する。

【0031】バンドパスフィルタ15は、光サーキュレータ121より到達した信号光を入力し、この信号光のうち特定波長のものを出力する。受光素子16は、バンドパスフィルタ15から出力された特定波長の信号光を受光し、その受光量に応じた値の電気信号を出力する。励起光源ユニット13は、励起光源をN個($N \geq 1$)有し、これらN個の励起光源から出力される光をラマン増幅用励起光として出力する。各々の励起光源が出力する光のスペクトルは、単峰型でない、或いは、可変である。制御部14は、受光素子16から出力された電気信号に基づいて、励起光源ユニット13から出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御し、或いは、スペクトルを制御する。

【0032】図2は、第1の実施形態に係るラマン増幅器1の励起光源ユニット13の構成図である。励起光源ユニット13は、N個の発光素子1311~131N、N個の光ファイバグレーティング1321~132Nおよび合波器133を有する。発光素子131nおよび光フ

イバグレーティング 132_nの1組は、1つの励起光源を構成している（ n は1以上 N 以下の任意の整数。以下同様。）。そして、合波器133は、 N 個の励起光源それぞれから出力された光を合波して、その合波した光をラマン増幅用励起光として出力する。

【0033】図3は、第1の実施形態に係るラマン増幅器1の励起光源ユニット13に含まれる各励起光源の構成図である。光ファイバグレーティング132_nは、光ファイバの光導波領域に屈折率変調が形成されたものであり、発光素子131_nの一方の端面との間で光の入出射が可能に対向して設けられて、発光素子131_nの他方の端面との間に共振器を構成している。このような共振器構造を有する励起光源が出力する光のスペクトルは、発光素子131_nにおける自然放出光のスペクトルおよび光ファイバグレーティング132_nにおける反射スペクトルに応じたものである。すなわち、光ファイバグレーティング132_nにおける反射スペクトルを適切に設計することで、励起光源が出力する光のスペクトルを単峰型でないものとすることができる。また、図3に示すように温度調整手段（例えばヒータやペルチェ素子など）134_{n1}～134_{n3}を設けて、光ファイバグレーティング132_nの温度を調整して反射スペクトルを調整することにより、図4（a）～（c）に示すように、励起光源が出力する光のスペクトルの形状を制御することができる。

【0034】図5は、ラマン増幅用励起光のスペクトルとラマン増幅の利得スペクトルとの関係を説明する図である。例えば、信号光が波長1.55 μ m帯のものであれば、ラマン増幅用励起光の波長は1.45 μ m付近である。ラマン増幅用光ファイバ11におけるラマン増幅の利得スペクトルは、ラマン増幅用励起光のパワーおよびスペクトルに依存して決まる。ラマン増幅用励起光が波長 λ_1 の単色でありパワー P_1 であるときに利得スペクトルが同図（a）に示すようなものであり、ラマン増幅用励起光が波長 λ_2 の単色でありパワー P_2 であるときに利得スペクトルが同図（b）に示すようなものであるとする。

【0035】このとき、同図（c）に示すように、波長 λ_1 でパワー P_1 であるラマン増幅用励起光と波長 λ_2 でパワー P_2 であるラマン増幅用励起光とを合波してラマン増幅用光ファイバ11に供給すれば、利得スペクトルは、同図（a）に示す利得スペクトルと同図（b）に示す利得スペクトルとを足し合わせたものとなる。また、同図（d）に示すように、同図（c）に示した励起光スペクトルと略同様の励起スペクトルを有するラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ11に供給したときにも、利得スペクトルは、同図（a）に示す利得スペクトルと同図（b）に示す利得スペクトルとを足し合わせたものと略同様となる。同図（c）または（d）に示した励起光スペクトルを有するラマン増幅用励起光は、既

に図3および図4を用いて説明した励起光源より出力され得る。

【0036】次に、第1の実施形態に係るラマン増幅器1の動作について説明する。励起光源ユニット13から出力されたラマン増幅用励起光は、光サーキュレータ122を経てラマン増幅用光ファイバ11に供給される。すなわち、励起光源ユニット13および光サーキュレータ122は、ラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ11に供給するラマン増幅用励起光供給手段として動作する。

【0037】ラマン増幅用光ファイバ11を伝搬した後の残留したラマン増幅用励起光は、光サーキュレータ121を経てバンドパスフィルタ15に入射し、そのうちの特定の波長のものがバンドパスフィルタ15を透過して受光素子16によりパワーが検出される。すなわち、光サーキュレータ121、バンドパスフィルタ15および受光素子16は、ラマン増幅用光ファイバ11を伝搬した後の残留したラマン増幅用励起光のパワーを検出する残留励起光パワー検出手段として動作する。

【0038】一方、このラマン増幅器1に到達した信号光は、光アイソレータ17および光サーキュレータ121を経た後に、ラマン増幅用光ファイバ11に入射する。そして、信号光は、ラマン増幅用光ファイバ11を伝搬するとともに、この伝搬の際にラマン増幅され、光サーキュレータ122を経て後段へ出力される。なお、ラマン増幅用光ファイバ11を伝搬する信号光は、ラマン増幅用光ファイバ11の各地点において非線形光学現象の発生が抑制される程度のパワーであることが好ましい。

【0039】そして、制御部14により、受光素子16により検出された残留ラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、励起光源ユニット13に含まれる N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御され、更にはスペクトルの形状が制御される。このとき、ラマン増幅用光ファイバ11における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持されるように、ラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルの形状が制御される。

【0040】以上のように、本実施形態に係るラマン増幅器1では、励起光源ユニット13に含まれる N 個の励起光源が出力する光のスペクトルが単峰型でなく、或いは、 N 個の励起光源が出力する光のスペクトルが可変であって、受光素子16により検出された残留ラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、制御部14によりラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルが制御されることにより、ラマン増幅用光ファイバ11における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持される。本実施形態に係るラマン増幅器1は、上記のような出力スペクトルを有する励起光源を採用したことで、従来の技術の欄に挙げた文献1のも

のと比較して、励起光源の個数を少なくすることができるので、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、また、コストが安くなる。また、本実施形態に係るラマン増幅器 1 は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、従来の技術の欄に挙げた文献 2 のものと比較して、やはり、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、また、励起効率が優れる。

【0041】なお、本実施形態では、バンドパスフィルタ 15 を設けることなく、残留ラマン増幅用光ファイバの全てのパワーを受光素子 16 により検出してもよい。また、光サーキュレータ 121、122 に替えて光カブラを用いてもよい。また、後方向励起ではなく、前方向励起であってもよいし、双方向励起であってもよい。

【0042】(第 2 の実施形態) 次に、本発明に係るラマン増幅器の第 2 の実施形態について説明する。図 6 は、第 2 の実施形態に係るラマン増幅器 2 の構成図である。このラマン増幅器 2 は、ラマン増幅用光ファイバ 21、光カブラ 221~223、励起光源ユニット 231、232、制御部 24、AWG (Arrayed-Waveguide Grating) 25 および受光素子 26 を備えている。

【0043】ラマン増幅用光ファイバ 21 は、光カブラ 221 および光カブラ 222 それぞれよりラマン増幅用励起光が供給され、光カブラ 221 から光カブラ 222 へ信号光を伝送するとともに、この信号光をラマン増幅する。光カブラ 221 は、このラマン増幅器 2 に到達した信号光をラマン増幅用光ファイバ 21 へ出力するとともに、励起光源ユニット 231 から到達したラマン増幅用励起光をもラマン増幅用光ファイバ 21 へ出力する。光カブラ 222 は、ラマン増幅用光ファイバ 21 から到達した信号光を光カブラ 223 へ出力するとともに、励起光源ユニット 232 から到達したラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ 21 へ出力する。

【0044】光カブラ 223 は、光カブラ 222 から到達した信号光の殆どを後段へ出力するとともに、一部を分岐して AWG 25 へ出力する。AWG 25 は、光カブラ 223 より到達した信号光を入力して分波し、分波した各波長の信号光を出力する。受光素子 26 は、AWG 25 から出力された各波長の信号光を受光し、その受光量に応じた値の電気信号を出力する。励起光源ユニット 231、232 は、励起光源を N 個 ($N \geq 1$) 有し、これら N 個の励起光源から出力される光をラマン増幅用励起光として出力する。各々の励起光源が出力する光のスペクトルは、単峰型でない、或いは、可変である。制御部 24 は、受光素子 26 から出力された電気信号に基づいて、励起光源ユニット 231、232 から出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御し、或いは、スペクトルを制御する。なお、本実施形態における励起光源ユニット 231、232 は、図 2~図 4 を用いて説明したものと同様である。

【0045】次に、第 2 の実施形態に係るラマン増幅器 2 の動作について説明する。励起光源ユニット 231 から出力されたラマン増幅用励起光は光カブラ 221 を経てラマン増幅用光ファイバ 21 に供給される。また、励起光源ユニット 232 から出力されたラマン増幅用励起光は光カブラ 222 を経てラマン増幅用光ファイバ 21 に供給される。すなわち、励起光源ユニット 231、232 および光カブラ 221、222 は、ラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ 21 に供給するラマン増幅用励起光供給手段として動作する。

【0046】このラマン増幅器 2 に到達した信号光は、光カブラ 221 を経た後に、ラマン増幅用光ファイバ 21 に入射する。そして、信号光は、ラマン増幅用光ファイバ 21 を伝搬するとともに、この伝搬の際にラマン増幅され、光カブラ 222 および光カブラ 223 を経て後段へ出力される。なお、ラマン増幅用光ファイバ 21 を伝搬する信号光は、ラマン増幅用光ファイバ 21 の各地点において非線形光学現象の発生が抑制される程度のパワーであることが好ましい。

【0047】ラマン増幅用光ファイバ 21 を伝搬した後の信号光の一部は、光カブラ 223 を経て AWG 25 に入射して AWG 25 により分波され、各波長の信号光のレベルが受光素子 26 により検出される。すなわち、光カブラ 223、AWG 25 および受光素子 26 は、ラマン増幅用光ファイバ 21 を伝搬した後の各波長の信号光のレベルを検出する信号光レベル検出手段として動作する。

【0048】そして、制御部 24 により、受光素子 26 により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、励起光源ユニット 231、232 に含まれる N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御され、更にはスペクトルの形状が制御される。このとき、ラマン増幅用光ファイバ 21 における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持されるように、ラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルの形状が制御される。

【0049】以上のように、本実施形態に係るラマン増幅器 2 では、励起光源ユニット 231、232 に含まれる N 個の励起光源が出力する光のスペクトルが単峰型でなく、或いは、N 個の励起光源が出力する光のスペクトルが可変であって、受光素子 26 により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、制御部 24 によりラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルが制御されることにより、ラマン増幅用光ファイバ 21 における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持される。本実施形態に係るラマン増幅器 2 は、上記のような出力スペクトルを有する励起光源を採用したことで、従来の技術の欄に挙げた文献 1 のものと比較して、励起光源の個数を少なくすることができるので、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、

また、コストが安くなる。また、本実施形態に係るラマン増幅器 2 は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、従来の技術の欄に挙げた文献 2 のものと比較して、やはり、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、また、励起効率が優れる。

【0050】また、本実施形態では、光カブラ 223、AWG 25 および受光素子 26 は、このラマン増幅器 2 に入力する信号光の波長を検出する信号光波長検出手段としても動作する。そして、制御部 24 により、検出された信号光の波長に基づいて、励起光源ユニット 231、232 に含まれる N 個の励起光源それぞれがラマン増幅用励起光を出力するか否かが制御される。このようにすることで、信号光の波長によっては、使用する励起光源の個数を減らすことができる。

【0051】なお、本実施形態では、AWG 25 に替えてバンドパスフィルタを設けてもよい。また、光カブラ 222 に替えて光サーキュレータを用いてもよい。また、双方向励起ではなく、前方向励起であってもよいし、後方向励起であってもよい。また、励起光源ユニット 231、232 それぞれ含まれる励起光源の個数は互いに同一でなくてもよい。

【0052】(第 3 の実施形態) 次に、本発明に係るラマン増幅器の第 3 の実施形態について説明する。図 7 は、第 3 の実施形態に係るラマン増幅器 3 の構成図である。このラマン増幅器 3 は、ラマン増幅用光ファイバ 31、光カブラ 321~324、励起光源ユニット 331、332、制御部 34、AWG 35、受光素子 36 および OTDR 部 37 を備えている。

【0053】ラマン増幅用光ファイバ 31 は、光カブラ 321 および光カブラ 322 それぞれよりラマン増幅用励起光が供給され、光カブラ 321 から光カブラ 322 へ信号光を伝送するとともに、この信号光をラマン増幅する。光カブラ 321 は、光カブラ 324 より到達した信号光をラマン増幅用光ファイバ 31 へ出力するとともに、励起光源ユニット 331 から到達したラマン増幅用励起光をもラマン増幅用光ファイバ 31 へ出力する。光カブラ 322 は、ラマン増幅用光ファイバ 31 から到達した信号光を後段へ出力するとともに、励起光源ユニット 332 から到達したラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ 31 へ出力する。

【0054】光カブラ 323 は、このラマン増幅器 3 に到達した信号光の殆どを光カブラ 324 へ出力するとともに、一部を分岐して AWG 35 へ出力する。AWG 35 は、光カブラ 323 より到達した信号光を入力して分波し、分波した各波長の信号光を出力する。受光素子 36 は、AWG 35 から出力された各波長の信号光を受光し、その受光量に応じた値の電気信号を出力する。

【0055】OTDR 部 37 は、パルス状の検査光をラマン増幅用光ファイバ 31 へ光カブラ 324 を介して導

入するとともに、この検査光がラマン増幅用光ファイバ 31 を伝搬する際に生じる後方散乱光を、光カブラ 324 を介して受光する。OTDR 部 37 は、この受光した後方散乱光の時間変化に基づいて、ラマン増幅用光ファイバ 31 の長手方向の損失分布を検出する。この検査光の波長は、信号光の波長とは異なるものであり、信号光波長間にあるのが好適である。

【0056】励起光源ユニット 331、332 は、励起光源を N 個 ($N \geq 1$) 有し、これら N 個の励起光源から出力される光をラマン増幅用励起光として出力する。各々の励起光源が出力する光のスペクトルは、単峰型でない、或いは、可変である。制御部 34 は、OTDR 部 37 により検出されたラマン増幅用光ファイバ 31 の長手方向の損失分布、および、受光素子 36 から出力された電気信号に基づいて、励起光源ユニット 331、332 から出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御し、或いは、スペクトルを制御する。なお、本実施形態における励起光源ユニット 331、332 は、図 2~図 4 を用いて説明したものと同様である。

【0057】次に、第 3 の実施形態に係るラマン増幅器 3 の動作について説明する。励起光源ユニット 331 から出力されたラマン増幅用励起光は光カブラ 321 を経てラマン増幅用光ファイバ 31 に供給される。また、励起光源ユニット 332 から出力されたラマン増幅用励起光は光カブラ 322 を経てラマン増幅用光ファイバ 31 に供給される。すなわち、励起光源ユニット 331、332 および光カブラ 321、322 は、ラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ 31 に供給するラマン増幅用励起光供給手段として動作する。

【0058】このラマン増幅器 3 に到達した信号光は、光カブラ 323、324 および 321 を経た後に、ラマン増幅用光ファイバ 31 に入射する。そして、信号光は、ラマン増幅用光ファイバ 31 を伝搬するとともに、この伝搬の際にラマン増幅され、光カブラ 322 を経て後段へ出力される。なお、ラマン増幅用光ファイバ 31 を伝搬する信号光は、ラマン増幅用光ファイバ 31 の各地点において非線形光学現象の発生が抑制される程度のパワーであることが好ましい。

【0059】このラマン増幅器 3 に到達した信号光の一部は、光カブラ 323 を経て AWG 35 に入射して AWG 35 により分波され、各波長の信号光のレベルが受光素子 36 により検出される。すなわち、光カブラ 323、AWG 35 および受光素子 36 は、このラマン増幅器 3 に入力する信号光の波長を検出する信号光波長検出手段として動作する。また、OTDR 部 37 により、ラマン増幅用光ファイバ 31 の長手方向の損失分布が検出される。

【0060】そして、制御部 34 により、OTDR 部 37 により検出されたラマン増幅用光ファイバ 31 の長手方向の損失分布に基づいて、励起光源ユニット 331、

332に含まれるN個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御され、更にはスペクトルの形状が制御される。このとき、ラマン増幅用光ファイバ31における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持されるように、ラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルの形状が制御される。

【0061】以上のように、本実施形態に係るラマン増幅器3では、励起光源ユニット331、332に含まれるN個の励起光源が出力する光のスペクトルが単峰型でなく、或いは、N個の励起光源が出力する光のスペクトルが可変であって、OTDR部37により検出されたラマン増幅用光ファイバ31の長手方向の損失分布に基づいて、制御部34によりラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルが制御されることにより、ラマン増幅用光ファイバ31における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持される。本実施形態に係るラマン増幅器3は、上記のような出力スペクトルを有する励起光源を採用したことで、従来の技術の欄に挙げた文献1のものと比較して、励起光源の個数を少なくすることができるので、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、また、コストが安くなる。また、本実施形態に係るラマン増幅器3は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、従来の技術の欄に挙げた文献2のものと比較して、やはり、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、励起効率が優れる。

【0062】また、本実施形態では、光カブラ323、AWG35および受光素子36により検出された信号光の波長に基づいて、制御部34により、励起光源ユニット331、332に含まれるN個の励起光源それぞれがラマン増幅用励起光を出力するか否かが制御される。このようにすることで、信号光の波長によっては、使用する励起光源の個数を減らすことができる。

【0063】なお、本実施形態では、光カブラ322に替えて光サーキュレータを用いてもよい。また、双方向励起ではなく、前方向励起であってもよいし、後方向励起であってもよい。また、励起光源ユニット331、332それぞれに含まれる励起光源の個数は互いに同一でなくともよい。

【0064】(第4の実施形態) 次に、本発明に係るラマン増幅器の第4の実施形態について説明する。図8は、第4の実施形態に係るラマン増幅器4の構成図である。このラマン増幅器4は、ラマン増幅用光ファイバ41、光カブラ421~423、励起光源ユニット431、432、制御部44および受光素子46を備えている。このラマン増幅器4は、信号光の他にパイロット信号をも伝送する光通信システムにおいて用いられるものである。このパイロット信号の波長は、信号光の波長とは異なるものであり、信号光波長間にあるのが好適である。

【0065】ラマン増幅用光ファイバ41は、光カブラ421および光カブラ422それぞれよりラマン増幅用励起光が供給され、光カブラ421から光カブラ422へ信号光およびパイロット光を伝送するとともに、これらの信号光およびパイロット光をラマン増幅する。光カブラ421は、このラマン増幅器4に到達した信号光をラマン増幅用光ファイバ41へ出力するとともに、励起光源ユニット431から到達したラマン増幅用励起光をもラマン増幅用光ファイバ41へ出力する。光カブラ422は、ラマン増幅用光ファイバ41から到達した信号光を光カブラ423へ出力するとともに、励起光源ユニット432から到達したラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ41へ出力する。

【0066】光カブラ423は、光カブラ422から到達した信号光および殆どのパイロット光を後段へ出力するとともに、パイロット光の一部を分岐して受光素子46へ出力する。受光素子46は、光カブラ423より到達したパイロット光を受光し、その受光量に応じた値の電気信号を出力する。励起光源ユニット431、432は、励起光源をN個($N \geq 1$)有し、これらN個の励起光源から出力される光をラマン増幅用励起光として出力する。各々の励起光源が出力する光のスペクトルは、単峰型でない、或いは、可変である。制御部44は、受光素子46から出力された電気信号に基づいて、励起光源ユニット431、432から出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御し、或いは、スペクトルを制御する。なお、本実施形態における励起光源ユニット431、432は、図2~図4を用いて説明したものと同様である。

【0067】次に、第4の実施形態に係るラマン増幅器4の動作について説明する。励起光源ユニット431から出力されたラマン増幅用励起光は光カブラ421を経てラマン増幅用光ファイバ41に供給される。また、励起光源ユニット432から出力されたラマン増幅用励起光は光カブラ422を経てラマン増幅用光ファイバ41に供給される。すなわち、励起光源ユニット431、432および光カブラ421、422は、ラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ41に供給するラマン増幅用励起光供給手段として動作する。

【0068】このラマン増幅器4に到達した信号光およびパイロット光は、光カブラ421を経た後に、ラマン増幅用光ファイバ41に入射する。そして、信号光およびパイロット光は、ラマン増幅用光ファイバ41を伝搬するとともに、この伝搬の際にラマン増幅され、光カブラ422および光カブラ423を経て後段へ出力される。なお、ラマン増幅用光ファイバ41を伝搬する信号光およびパイロット信号は、ラマン増幅用光ファイバ41の各地点において非線形光学現象の発生が抑制される程度のパワーであることが好ましい。

【0069】ラマン増幅用光ファイバ41を伝搬した後、パイロット光の一部は、光カブラ423を経て受光素

子46に入射して、パイロット光のレベルが受光素子46により検出される。すなわち、光カブラ42₃および受光素子46は、ラマン増幅用光ファイバ41を伝搬した後のパイロット光のレベルを検出するパイロット光レベル検出手段として動作する。

【0070】そして、制御部44により、受光素子46により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、励起光源ユニット43₁、43₂に含まれるN個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御され、更にはスペクトルの形状が制御される。このとき、ラマン増幅用光ファイバ41における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持されるように、ラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルの形状が制御される。

【0071】以上のように、本実施形態に係るラマン増幅器4では、励起光源ユニット43₁、43₂に含まれるN個の励起光源が出力する光のスペクトルが単峰型でなく、或いは、N個の励起光源が出力する光のスペクトルが可変であって、受光素子46により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、制御部44によりラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルが制御されることにより、ラマン増幅用光ファイバ41における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持される。本実施形態に係るラマン増幅器4は、上記のような出力スペクトルを有する励起光源を採用したことで、従来の技術の欄に挙げた文献1のものと比較して、励起光源の個数を少なくすることができるので、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、また、コストが安くなる。また、本実施形態に係るラマン増幅器4は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、従来の技術の欄に挙げた文献2のものと比較して、やはり、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、また、励起効率が優れる。

【0072】なお、本実施形態では、光カブラ42₂に替えて光サーキュレータを用いてもよい。また、双方向励起ではなく、前方向励起であってもよいし、後方向励起であってもよい。また、励起光源ユニット43₁、43₂それぞれ含まれる励起光源の個数は互いに同一でなくてもよい。

【0073】（第5の実施形態）次に、本発明に係るラマン増幅器の第5の実施形態について説明する。図9は、第5の実施形態に係るラマン増幅器5の構成図である。このラマン増幅器5は、ラマン増幅用光ファイバ51、光カブラ52₁～52₄、励起光源ユニット53₁、53₂、制御部54および受光素子56₁、56₂を備えている。

【0074】ラマン増幅用光ファイバ51は、光カブラ52₁および光カブラ52₂それぞれよりラマン増幅用励起光が供給され、光カブラ52₁から光カブラ52₂へ信

号光を伝送するとともに、この信号光をラマン増幅する。光カブラ52₁は、光カブラ52₃より到達した信号光をラマン増幅用光ファイバ51へ出力するとともに、励起光源ユニット53₁から到達したラマン増幅用励起光をもラマン増幅用光ファイバ51へ出力する。光カブラ52₂は、ラマン増幅用光ファイバ51から到達した信号光を光カブラ52₄へ出力するとともに、励起光源ユニット53₂から到達したラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ51へ出力する。

10 【0075】光カブラ52₃は、このラマン増幅器5に到達した信号光の殆どを光カブラ52₁へ出力するとともに、信号光の一部を受光素子56₁へ出力する。受光素子56₁は、光カブラ52₃より到達した信号光を受光し、その受光量に応じた値の電気信号を出力する。また、光カブラ52₄は、光カブラ52₂より到達した信号光の殆どを後段へ出力するとともに、信号光の一部を受光素子56₂へ出力する。受光素子56₂は、光カブラ52₄より到達した信号光を受光し、その受光量に応じた値の電気信号を出力する。

20 【0076】励起光源ユニット53₁、53₂は、励起光源をN個（N≧1）有し、これらN個の励起光源から出力される光をラマン増幅用励起光として出力する。各々の励起光源が出力する光のスペクトルは、単峰型でない、或いは、可変である。制御部54は、受光素子56₁、56₂それぞれから出力された電気信号に基づいて、励起光源ユニット53₁、53₂から出力されるラマン増幅用励起光のパワーを制御し、或いは、スペクトルを制御する。なお、本実施形態における励起光源ユニット53₁、53₂は、図2～図4を用いて説明したものと同様である。

30 【0077】次に、第5の実施形態に係るラマン増幅器5の動作について説明する。励起光源ユニット53₁から出力されたラマン増幅用励起光は光カブラ52₁を経てラマン増幅用光ファイバ51に供給される。また、励起光源ユニット53₂から出力されたラマン増幅用励起光は光カブラ52₂を経てラマン増幅用光ファイバ51に供給される。すなわち、励起光源ユニット53₁、53₂および光カブラ52₁、52₂は、ラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ51に供給するラマン増幅用励起光供給手段として動作する。

40 【0078】このラマン増幅器5に到達した信号光は、光カブラ52₃および52₁を経た後に、ラマン増幅用光ファイバ51に入射する。そして、信号光は、ラマン増幅用光ファイバ51を伝搬するとともに、この伝搬の際にラマン増幅され、光カブラ52₂および52₄を経て後段へ出力される。なお、ラマン増幅用光ファイバ51を伝搬する信号光は、ラマン増幅用光ファイバ51の各地点において非線形光学現象の発生が抑制される程度のパワーであることが好ましい。

50 【0079】このラマン増幅器5に到達した信号光の一

部は、光カブラ 5 2₃を経て受光素子 5 6₁に入射して、入力信号光パワーが受光素子 5 6₁により検出される。すなわち、光カブラ 5 2₃および受光素子 5 6₁は、ラマン増幅用光ファイバ 5 1 に入力する信号光のパワーを検出する入力信号光パワー検出手段として動作する。また、このラマン増幅器 5 から出力される信号光の一部は、光カブラ 5 2₄を経て受光素子 5 6₂に入射して、出力信号光パワーが受光素子 5 6₂により検出される。すなわち、光カブラ 5 2₄および受光素子 5 6₂は、ラマン増幅用光ファイバ 5 1 から出力される信号光のパワーを検出する出力信号光パワー検出手段として動作する。

【0080】そして、制御部 5 4 により、受光素子 5 6₁により検出された入力信号光パワーおよび受光素子 5 6₂により検出された出力信号光パワーに基づいて、励起光源ユニット 5 3₁、5 3₂に含まれる N 個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーが制御され、更にはスペクトルの形状が制御される。このとき、ラマン増幅用光ファイバ 5 1 における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持されるように、ラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルの形状が制御される。

【0081】以上のように、本実施形態に係るラマン増幅器 5 では、励起光源ユニット 5 3₁、5 3₂に含まれる N 個の励起光源が出力する光のスペクトルが単峰型でなく、或いは、N 個の励起光源が出力する光のスペクトルが可変であって、入力信号光パワーおよび出力信号光パワーに基づいて、制御部 5 4 によりラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルが制御されることにより、ラマン増幅用光ファイバ 5 1 における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持される。本実施形態に係るラマン増幅器 5 は、上記のような出力スペクトルを有する励起光源を採用したことで、従来の技術の欄に挙げた文献 1 のものと比較して、励起光源の個数を少なくすることができるので、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、また、コストが安くなる。また、本実施形態に係るラマン増幅器 5 は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、従来の技術の欄に挙げた文献 2 のものと比較して、やはり、利得スペクトルの平坦化の制御が容易であり、また、励起効率が優れる。

【0082】なお、本実施形態では、光カブラ 5 2₂に替えて光サーキュレータを用いてもよい。また、双方向励起ではなく、前方向励起であってもよいし、後方向励起であってもよい。また、励起光源ユニット 5 3₁、5 3₂それぞれ含まれる励起光源の個数は互いに同一でなくてもよい。

【0083】(第 6 の実施形態) 次に、本発明に係るラマン増幅器の第 6 の実施形態について説明する。図 10 は、第 6 の実施形態に係るラマン増幅器 6 の構成図である。このラマン増幅器 6 は、ラマン増幅用光ファイバ 6

1、光カブラ 6 2、励起光源ユニット 6 3、制御部 6 4 および光アイソレータ 6 7 を備えている。

【0084】ラマン増幅用光ファイバ 6 1 は、光カブラ 6 2 よりラマン増幅用励起光が供給され、光アイソレータ 6 7 から光カブラ 6 2 へ信号光を伝送するとともに、この信号光をラマン増幅する。光アイソレータ 6 7 は、順方向にのみ光を通過させ、逆方向には光を通過させない。光カブラ 6 2 は、ラマン増幅用光ファイバ 6 1 から到達した信号光を後段へ出力するとともに、励起光源ユニット 6 3 から到達したラマン増幅用励起光をラマン増幅用光ファイバ 6 1 へ出力する。

【0085】励起光源ユニット 6 3 は、ラマン増幅用光ファイバ 6 1 へ供給するラマン増幅用励起光を出力するものであり、Er 元素添加光ファイバ増幅器 (EDF A: Erbium-Doped Fiber Amplifier) 6 3 1 および 6 3 2 ならびに光フィルタ 6 3 3 を有する。EDF A 6 3 1 は、Er 元素添加光ファイバ (EDF: Erbium-Doped Fiber) 6 3 1 a、光カブラ 6 3 1 b および励起光源 6 3 1 c を含む。また、EDF A 6 3 2 は、EDF 6 3 2 a、光カブラ 6 3 2 b および励起光源 6 3 2 c を含む。

【0086】EDF 6 3 1 a、6 3 2 a は、希土類元素である Er 元素が光導波領域に添加された光ファイバであり、波長 1.48 μm または 0.98 μm の励起光が供給されると Er 元素が励起され、波長 1.55 μm 帯の自然放出光を発生する。自然放出光のスペクトルは、EDF 6 3 1 a、6 3 2 a に添加された Er 元素およびその他の元素 (例えば Al 元素) の濃度に依存している。励起光源 6 3 1 c、6 3 2 c は、Er 元素を励起し得る波長 1.48 μm または 0.98 μm の励起光を出力するものである。光カブラ 6 3 1 b、6 3 2 b は、励起光源 6 3 1 c、6 3 2 c から出力された励起光を EDF 6 3 1 a、6 3 2 a に供給し、また、EDF 6 3 1 a、6 3 2 a で発生した自然放出光をラマン増幅用励起光として光カブラ 6 2 へ向けて通過させる。光フィルタ 6 3 3 は、EDF A 6 3 1 と EDF A 6 3 2 との間に挿入されており、ラマン増幅用光ファイバ 6 1 にラマン増幅用励起光として供給する自然放出光のスペクトルを調整するものである。

【0087】制御部 6 4 は、励起光源 6 3 1 c、6 3 2 c から出力される励起光のパワーを制御することで、励起光源ユニット 6 3 から出力されるラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルを制御する。さらに、制御部 6 4 は、光フィルタ 6 3 3 の損失スペクトルを制御することでも、ラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルを制御してもよい。なお、この制御に際しては、第 1 の実施形態の場合と同様にラマン増幅用光ファイバ 6 1 を伝搬した後の残留したラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、第 2 の実施形態の場合と同様にラマン増幅用光ファイバ 6 1 を伝搬する信号光の波長に基づいて、第 3 の実施形態の場合と同様にラマン増幅用光ファイバ 6

1の長手方向の損失分布に基づいて、第4の実施形態の場合と同様にパイロット光のレベルに基づいて、または、第5の実施形態の場合と同様に入力信号光パワーおよび出力信号光パワーに基づいて、ラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルを制御するのが好適である。

【0088】次に、第6の実施形態に係るラマン増幅器6の動作について説明する。EDFA631において、励起光源631cから出力された励起光は、光カプラ631bを経てEDF631aに供給される。同様に、EDFA632において、励起光源632cから出力された励起光は、光カプラ632bを経てEDF632aに供給される。

【0089】前段のEDFA632のEDF632aに励起光が供給されると、このEDF632aで自然放光が発生する。EDF632aで発生した自然放光は、光カプラ632bを経て光フィルタ633に入力し、この光フィルタ633によりスペクトルが調整されて、後段のEDFA631のEDF631aに入力する。

【0090】後段のEDFA631のEDF631aに励起光が供給され、光フィルタ633を通過した自然放光がEDF631aに入力すると、このEDF631aにおいて、光フィルタ633を通過した自然放光が光増幅されるとともに、新たに自然放光が発生する。EDF631aで増幅され或いは新たに発生した自然放光は、光カプラ631bおよび光カプラ62を経て、ラマン増幅用励起光としてラマン増幅用光ファイバ61に供給される。

【0091】すなわち、励起光源ユニット63および光カプラ62は、ラマン増幅用励起光（波長1.55μm帯）をラマン増幅用光ファイバ61に供給するラマン増幅用励起光供給手段として動作する。また、この励起光源ユニット63からラマン増幅用光ファイバ61に供給されるラマン増幅用励起光は、EDF631a、632aで発生した自然放光であるので、広帯域のスペクトルを有する。

【0092】一方、このラマン増幅器6に到達した信号光（波長1.65μm帯）は、光アイソレータ67を経た後に、ラマン増幅用光ファイバ61に入射する。そして、信号光は、ラマン増幅用光ファイバ61を伝搬するとともに、この伝搬の際にラマン増幅され、光カプラ62を経て後段へ出力される。なお、ラマン増幅用光ファイバ61を伝搬する信号光は、ラマン増幅用光ファイバ61の各地点において非線形光学現象の発生が抑制される程度のパワーであることが好ましい。

【0093】そして、制御部64により、励起光源ユニット63に含まれる励起光源631c、632cそれぞれから出力される励起光のパワーが制御され、或いは更に光フィルタ633の損失スペクトルが制御されて、ラマン増幅用光ファイバ61に供給されるラマン増幅用励

起光のパワーが制御され、更にはスペクトルの形状が制御される。このとき、ラマン増幅用光ファイバ61における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持されるように、ラマン増幅用励起光のパワーやスペクトルの形状が制御される。

【0094】以上のように、本実施形態に係るラマン増幅器6では、励起光源ユニット63から出力されるラマン増幅用励起光が広帯域のスペクトルを有しており、また、励起光源631c、632cの出力パワーの制御（更には光フィルタ633の損失スペクトルの制御）によりラマン増幅用励起光のスペクトルが制御部64により制御されることにより、ラマン増幅用光ファイバ61における信号光のラマン増幅の利得スペクトルが信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持される。本実施形態に係るラマン増幅器6は、上記のような出力スペクトルを有する励起光源を採用したことで、従来の技術の欄に挙げた文献1のものと比較して、励起光源の個数を少なくすることができるので、利得スペクトルの平坦化の制御が容易である。また、本実施形態に係るラマン増幅器1は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、従来の技術の欄に挙げた文献2のものと比較して、やはり、利得スペクトルの平坦化の制御が容易である。

【0095】なお、本実施形態では、光カプラ62に替えて光サーキュレータを用いてもよい。また、後方向励起ではなく、前方向励起であってもよいし、双方向励起であってもよい。また、EDF631a、632aに替えて、他の希土類元素（例えば、Nd元素、Pr元素、など）が添加された光ファイバを用いてもよく、この場合には、その希土類元素を励起し得る波長の励起光を出力する光源が励起光源631c、632cとして用いられる。

【0096】本発明は、上記実施形態に限定されるものではなく種々の変形が可能である。例えば、上記の各実施形態に係るラマン増幅器に加えて希土類元素添加光ファイバ増幅器（好適にはEr元素添加光ファイバ増幅器）を用いて信号光を光増幅してもよい。

【0097】

【発明の効果】以上、詳細に説明したとおり、本発明によれば、ラマン増幅用励起光供給手段に含まれるN個の励起光源が出力する光のスペクトルが単峰型ではないので、或いは、スペクトルが可変であって制御手段により制御されるので、従来の場合と比べて励起光源の個数を少なくすることができ、利得スペクトルの平坦化の制御が容易である。また、このラマン増幅器は、利得等化器を用いることなく利得スペクトルを平坦にすることができるので、この点でも、従来と比べて利得スペクトルの平坦化の制御が容易である。

【0098】残留励起光パワー検出手段により検出され

たラマン増幅用励起光のパワーに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルが制御手段により制御される場合には、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0099】信号光レベル検出手段により検出された各波長の信号光のレベルに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルが制御手段により制御される場合には、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0100】光ファイバ損失分布検出手段により検出されたラマン増幅用光ファイバの長手方向の損失分布に基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルが制御手段により制御される場合には、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0101】パイロット光レベル検出手段により検出されたパイロット光のレベルに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルが制御手段により制御される場合には、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0102】入力信号光パワーおよび出力信号光パワーに基づいて、N個の励起光源それぞれから出力されるラマン増幅用励起光のパワーまたはスペクトルが制御手段により制御される場合には、ラマン増幅用光ファイバにおける信号光のラマン増幅の利得スペクトルを信号光波長帯域において平坦かつ一定に維持することができる。

【0103】信号光波長検出手段により検出された信号光の波長に基づいて、N個の励起光源それぞれがラマン増幅用励起光を出力するか否かが制御手段により制御される場合には、信号光の波長によっては、使用する励起光源の個数を減らすことができる。

【0104】また、N個の励起光源の何れかは、希土類元素が光導波領域に添加された希土類元素添加光ファイバと、この希土類元素を励起する希土類元素励起光を希土類元素添加光ファイバに供給する希土類元素励起光供給手段とを有し、希土類元素励起光供給手段による希土類元素励起光の供給に伴い希土類元素添加光ファイバにおいて発生し増幅された自然放出光をラマン増幅用励起光とするのが好適である。この場合には、自然放出光が広帯域のスペクトルを有しているため、ラマン増幅用励起光供給手段に含まれる励起光源を更に少なくすることができ、これに因り、ラマン増幅用光ファイバにおけるラマン増幅の利得スペクトルの平坦化の制御が更に容易

である。

【0105】また、組成が互いに異なる希土類元素添加光ファイバが複数段接続されているのが好適であり、また、N個の励起光源の何れかは、ラマン増幅用光ファイバにラマン増幅用励起光として供給する自然放出光のスペクトルを調整する光フィルタを更に備えるのが好適であり、これら何れの場合には、ラマン増幅用光ファイバにおけるラマン増幅の利得スペクトルを平坦化する上で更に好適である。

10 【図面の簡単な説明】

【図1】第1の実施形態に係るラマン増幅器の構成図である。

【図2】ラマン増幅器の励起光源ユニットの構成図である。

【図3】ラマン増幅器の励起光源ユニットに含まれる各励起光源の構成図である。

【図4】ラマン増幅器の励起光源ユニットに含まれる各励起光源の出力光スペクトルの制御の様子を説明する図である。

20 【図5】ラマン増幅用励起光のスペクトルとラマン増幅の利得スペクトルとの関係を説明する図である。

【図6】第2の実施形態に係るラマン増幅器の構成図である。

【図7】第3の実施形態に係るラマン増幅器の構成図である。

【図8】第4の実施形態に係るラマン増幅器の構成図である。

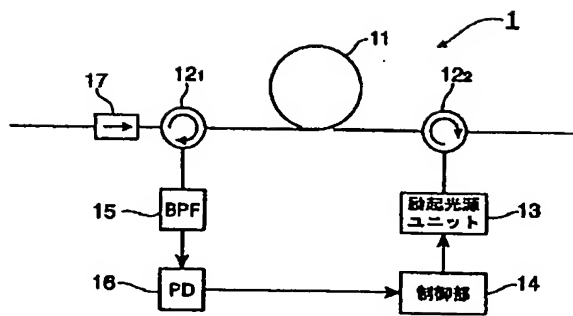
【図9】第5の実施形態に係るラマン増幅器の構成図である。

30 【図10】第6の実施形態に係るラマン増幅器の構成図である。

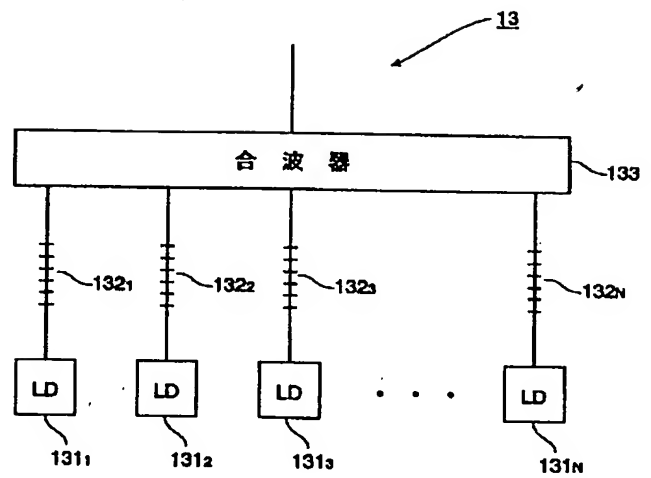
【符号の説明】

1～6…ラマン増幅器、11…ラマン増幅用光ファイバ、12₁、12₂…光サーキュレータ、13…励起光源ユニット、14…制御部、15…バンドパスフィルタ、16…受光素子、17…光アイソレータ、21…ラマン増幅用光ファイバ、22₁～22₃…光カプラ、23₁、23₂…励起光源ユニット、24…制御部、25…AWG、26…受光素子、31…ラマン増幅用光ファイバ、32₁～32₄…光カプラ、33₁、33₂…励起光源ユニット、34…制御部、35…AWG、36…受光素子、37…OTDR部、41…ラマン増幅用光ファイバ、42₁～42₃…光カプラ、43₁、43₂…励起光源ユニット、44…制御部、46…受光素子、51…ラマン増幅用光ファイバ、52₁～52₄…光カプラ、53₁、53₂…励起光源ユニット、54…制御部、56₁、56₂…受光素子、61…ラマン増幅用光ファイバ、62…光カプラ、63…励起光源ユニット、64…制御部、67…光アイソレータ。

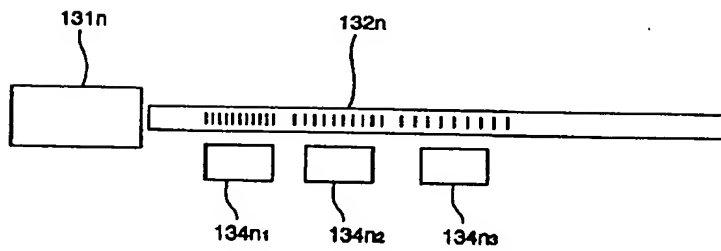
【図1】



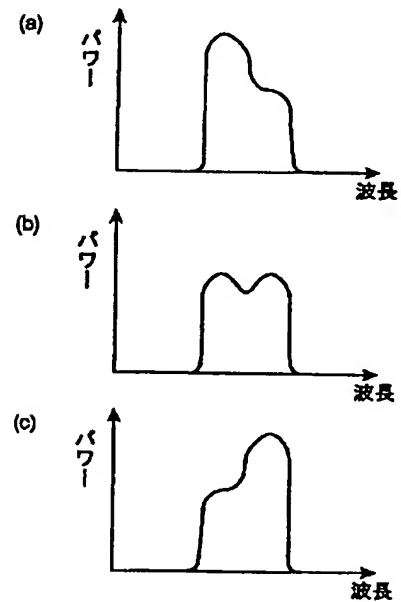
【図2】



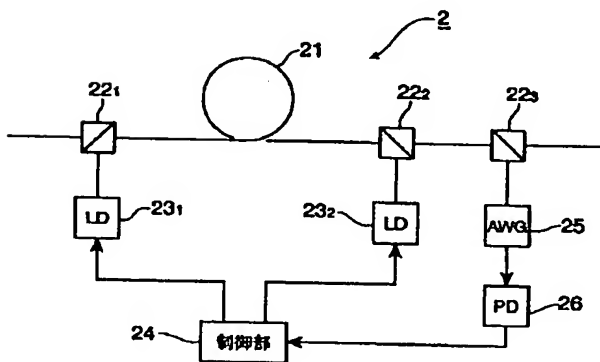
【図3】



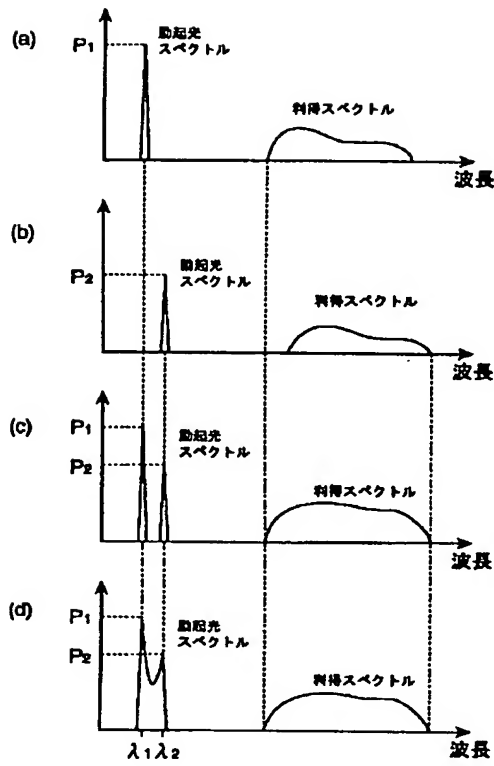
【図4】



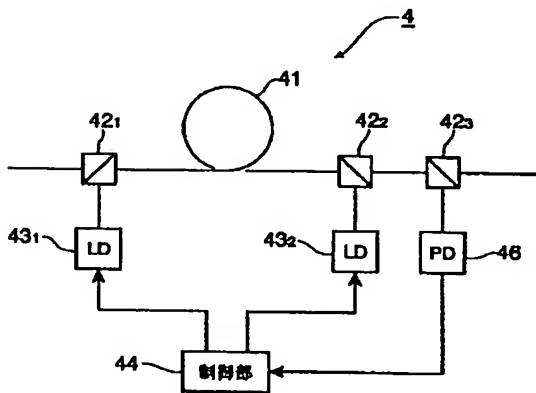
【図6】



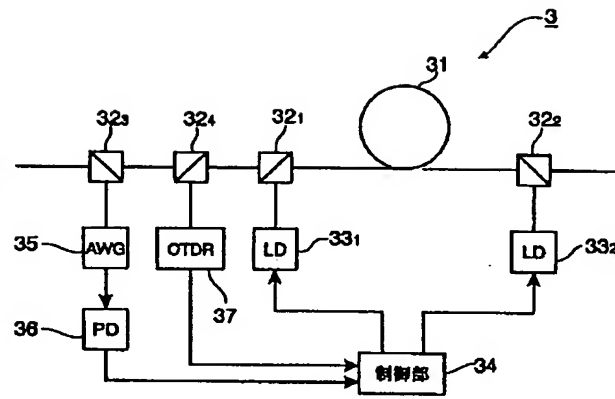
【図 5】



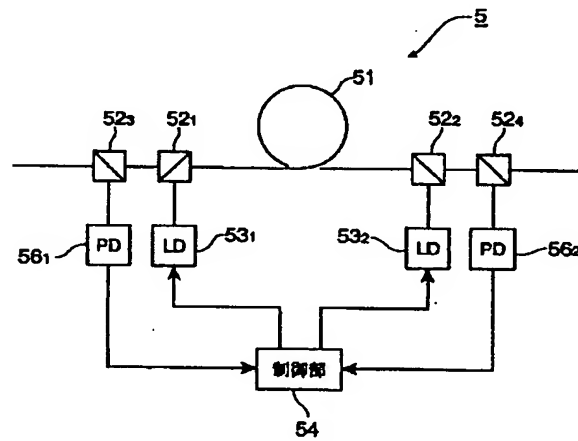
【図 8】



【図 7】



【図 9】



【図 10】

